

넓은 입력 및 출력 전압 Dual active bridge 컨버터 제어기 설계를 위한 소신호 모델링

윤동관, 김수홍
LG 이노텍

Small signal modeling for controller design of wide input and output voltage dual active bridge converter

Dongkwan Yoon, SooHong Kim
LG Innotek

ABSTRACT

This paper proposes the current controller design procedure for dual active bridge (DAB) with wide input and output voltage range. A various pulse width modulation (PWM) methods are utilized for improving the efficiency to entire voltage range. Then, the current controller design scheme is proposed considering the PWM technique. The theoretical derived model is verified through the AC-sweep simulation results. Subsequently, the proposed controller design procedure is verified through the simulation results.

1. 서론

DAB 컨버터는 일반적으로 1차측과 2차측의 위상을 조절하여 전력을 전달하며, 입력 전압과 출력 전압의 변압비가 변압기와 일치할 때 고효율 동작을 하는 특징이 있다. 입력 전압과 출력 전압의 비가 변압기와 다르게 되면 소프트 스위칭 동작을 수행하지 못하며, 무효전력이 증가하여 스위치에 RMS가 증가하게 된다. 따라서 DAB 컨버터의 전력 손실이 증가하게 된다. 이러한 DAB 컨버터 변조기법의 단점을 해결하기 위해 PWM 제어기법이 연구되어 왔다^[1]. PWM 제어 기법을 적용하면 스위치의 RMS 전류를 줄이며, 모든 전압, 전력 조건에서 소프트 스위칭 동작을 수행할 수 있다. 다양한 논문에서 DAB 컨버터의 효율 향상을 위한 PWM 변조 기법은 연구되었지만, 새로운 변조 기법이 적용된 제어기 설계 절차에 대한 내용을 다루지 않았다. 본 논문에서는 PWM 변조 기법을 적용한 DAB 컨버터의 모델링 방법을 제안한다.

2. DAB 컨버터 소신호 모델링

소신호 모델링은 특정 동작점에서 컨버터의 특성을 분석하는 방법으로 시스템의 주파수응답 특성을 얻어 안정성을 평가하고, 페루프 제어기 설계에 유용한 장점을 가지고 있다. DAB 컨버터는 1차와 2차 사이의 위상을 조정하여 출력 전류 제어가 수행된다. 본 논문에서는 다양한 입/출력 전압 조건에서 소프트 스위칭 동작을 확보하며 안정적인 전류 제어기 설계를 위해 위상 변동에 따른 출력 전류의 응답성에 관한 시스템 전달함수 유도를 진행한다.

1.1 절 DAB 컨버터 전력 방정식

입력 및 출력 전압에 따른 DAB 컨버터의 전력 방정식은 다음과 같다^[2].

$$P = \frac{V_{in}V_o}{2\pi f_{sw}nL_{lk}} \left(\phi - \frac{\phi^2}{\pi} \right) \quad (1)$$

$$P = \begin{cases} \frac{V_{in}V_o}{2\pi f_{sw}L_{lk}} \left[\left(\phi - \frac{\phi^2}{\pi} \right) + \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{2\phi + \alpha}{\pi} \right) \right], & \text{if } \phi > 0 \\ \frac{V_{in}V_o}{2\pi f_{sw}L_{lk}} \left[\phi + \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{2\phi + \alpha}{\pi} \right) \right], & \text{if } \phi < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$P = \begin{cases} \frac{V_{in}V_o}{2\pi f_{sw}L_{lk}} \left[\left(\phi - \frac{\phi^2}{\pi} \right) + \frac{\beta}{2} \left(1 - \frac{2\phi + \beta}{\pi} \right) \right], & \text{if } \phi > 0 \\ \frac{V_{in}V_o}{2\pi f_{sw}L_{lk}} \left[\phi + \frac{\beta}{2} \left(1 - \frac{2\phi + \beta}{\pi} \right) \right], & \text{if } \phi < 0 \end{cases} \quad (3)$$

수식에서 f_{sw} , n , L_{lk} , ϕ , α , β 는 각각 스위칭 주파수, 변압비, 누설 인덕터, 1차측과 2차측 사이의 위상, 1차측 H-bridge leg 사이의 위상, 그리고 2차측 H-bridge leg 사이의 위상을 나타낸다. DAB 컨버터는 입/출력 전압 조건에 따라 PS (Phase Shift), 또는 SPWM(Single PWM) 변조기법을 사용하여 전력을 전달한다. 입/출력 전압비가 변압비와 동일할 때에는 PS 변조기법을 적용하며, 강압 또는 승압 동작을 할 때에는 SPWM 기법을 적용하여 소프트 스위칭 동작을 수행한다. 여기서 강압 모드는 입력 전압이 출력 전압 보다 큰 경우이며 입력 전압이 출력 전압 보다 작은 경우는 승압 모드로 정의한다.

1.2 절 DAB 컨버터 소신호 모델링

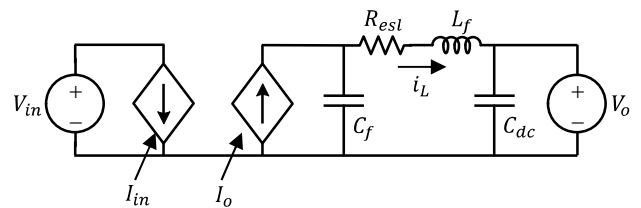


그림 1 DAB 컨버터 평균 모델

Fig 1 Average model of DAB converter

그림 1은 소신호 모델 유도를 위한 DAB 컨버터의 평균 모델을 나타낸다. 그림에서 V_{in} , I_{in} , I_o , C_f , R_{esl} , L_f , C_{dc} , 그리고 V_o 는 각각 입력 전압, 입력 평균 전류, 출력 평균 전류, 필터 커패시터, 필터 인덕터의 기생저항, 필터 인덕터, DC-

link 커패시터, 그리고 출력 전압을 나타낸다. 소신호 모델을 위한 DAB 컨버터의 평균 모델 방정식은 다음과 같다.

$$V_{Cf} = i_o(L_f s + R_{est}) + V_o \quad (4)$$

$$C_f V_{Cf} = \frac{V_{in}}{2\pi f_{sw} n L_{lk}} \left(\phi - \frac{\phi^2}{\pi} \right) - i_L \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_L = i_L + \hat{i}_L \\ \phi = \phi + \hat{\phi} \\ V_o = 0 \end{cases} \quad (6)$$

수식 (4), (5)는 소신호 모델 유도를 위한 DAB 컨버터의 평균 방정식을 나타낸다. 수식의 간소화를 위해 효율은 1이라 가정한다. 본 논문에서는 전류 제어기 설계를 위해 위상-출력 전류에 대한 유도를 진행한다. 수식 (6)을 수식 (4), (5) 대입하여 전달함수를 얻을 수 있으며 1 대 1 전압 조건에서의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{i_o \phi} = \frac{i_o}{\phi} = \frac{V_{in}}{2\pi f_{sw} n L_{lk}} \left(\frac{\pi - 2\phi}{\pi} \right) \left(\frac{1}{L_f C_f s^2 + C_f R_{est} s + 1} \right) \quad (7)$$

DAB 컨버터가 승압 또는 강압 모드에서 동작하는 조건에서도 수식 (2), (3)을 활용하여 유도할 수 있다.

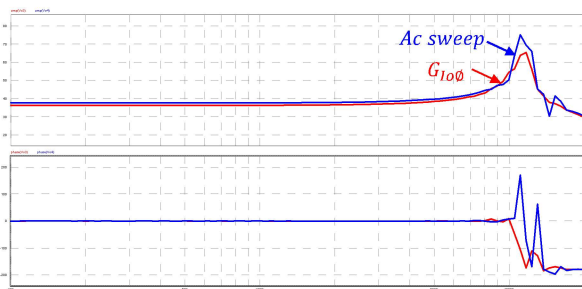
1.3 절 시뮬레이션 결과

앞의 절에서 유도한 모델링을 검증하기 Powersim 社の PSIM 소프트웨어 툴을 사용했다. DAB 컨버터의 제정 수는 표 1과 같다. 그림 2는 PSIM AC-sweep 모의실험 결과와 수식으로 유도한 전달함수의 주파수 응답 특성을 보여 준다.

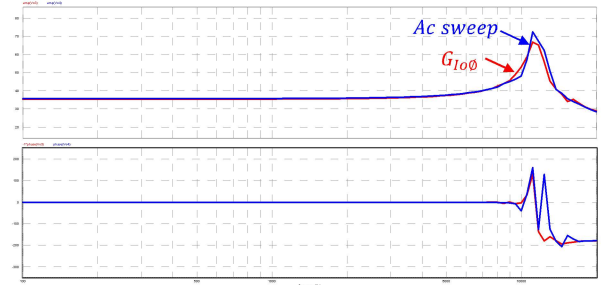
표 1. DAB 컨버터 파라미터.

Table 1. Parameters of DAB converter.

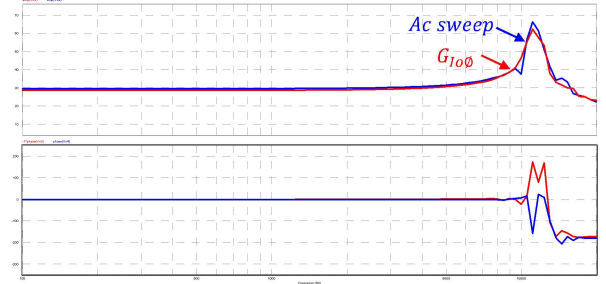
입력 전압(V_{in})	275 ~ 500 V	필터 인덕터(L_f)	7 μ H
출력 전압(V_o)	300 ~ 600 V	기생 저항(R_{est})	0.001
변압비(n)	1	필터 커패시터(C_f)	34 μ F
누설 인덕터(L_{lk})	12 μ H	DC 커패시터(C_{dc})	165 μ F
스위칭 주파수(f_{sw})	60 kHz	정격 전력(P)	12.5 kW



(a)



(b)



(c)

그림 2 동작 조건에 따른 DAB 컨버터 주파수 응답 특성. (a) 1 대 1 전압 조건. (b) 강압 동작 조건. (c) 승압 동작 조건.

Fig 2 Frequency response of DAB converter. (a) unit-gain operation mode. (b) step-down operation mode. (c) step-up operation mode.

모의실험 결과와 같이 단위 이득, SPWM 변조 기법이 적용된 승압 / 강압 동작 조건에서도 전 주파수 영역에서의 이득과 위상이 동일한 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 PWM 제어를 고려한 DAB 컨버터의 시스템 모델을 제안하였다. 유도한 모델은 PSIM 소프트웨어 툴을 통해 적합성을 검증 진행하였으며, 다양한 입/출력 전압 조건에서도 이득과 위상이 일치하는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 모델을 이용하여 제어기를 설계한다면 넓은 입력 및 출력 전압 조건에서 소프트 스위칭 동작을 확보하며 제어기 설계 및 안정도 평가를 진행할 수 있다.

참고 문헌

- [1] 변병주, "듀얼-액티브-브리지 컨버터의 고효율 변조 기법", 건국대학교 박사학위 청구 논문, 2020
- [2] A. K. Jain and R. Ayyanar, "Pwm control of dual active bridge: Comprehensive analysis and experimental verification," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 4, pp. 1215-1227, April 2011, doi: 10.1109/TPEL.2010.2070519.